



Comportement magneto-mécanique dissipatif des matériaux ferromagnétiques sous chargement mécanique multiaxial.

Mahmoud Rekik, Olivier Hubert, Laurent Daniel, Thierry Waeckerle, Marc Tunizini

► To cite this version:

Mahmoud Rekik, Olivier Hubert, Laurent Daniel, Thierry Waeckerle, Marc Tunizini. Comportement magneto-mécanique dissipatif des matériaux ferromagnétiques sous chargement mécanique multiaxial.. Mecamat2012, 2012. hal-00670466

HAL Id: hal-00670466

<https://hal.science/hal-00670466>

Submitted on 15 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMPORTEMENT MAGNETO-MECANIQUE DISSIPATIF DES MATERIAUX FERROMAGNETIQUES SOUS CHARGEMENT MECANIQUE MULTIAXIAL

M. Rekik^{a,b}, O. Hubert^a, L. Daniel^b, T. Waeckerlé^c, M. Tunzini^d

^a LMT-Cachan (ENS-Cachan, CNRS UMR 8535, UPMC) 61 avenue du président Wilson, 94235 Cachan. Téléphone : + 33 1 47 40 22 24, Télécopie : + 33 1 47 40 22 40. rekik@lmt.ens-cachan.fr; hubert@lmt.ens-cachan.fr

^b LGEP (SUPELEC, CNRS UMR 8507, UPMC, Univ Paris-Sud) 11 rue Joliot-Curie, Plateau du Moulon, 91192 Gif sur Yvette, France. laurent.daniel@u-psud.fr

^c Centre de Recherche d'Imphy (CRY) Aperam Alloys Imphy, 123 rue de Parigny F-58000 Nevers. thierry.waeckerle@aperam.com

^d Thales Avionics Electrical Systems SA -TAES 41 Boulevard de la République BP 53 F-78401 Chatou. marc.tunzini@fr.thalesgroup.com

Mots clés : contraintes biaxiales, magnétisme, magnétostriction, dissipation, fréquences dynamiques.

1 CADRE DE L'ETUDE

Les parties électrotechniques d'un avion représentent environ 35% de la masse des équipements de la chaîne de puissance électrique, et les technologies actuellement utilisées ont atteint leur seuil d'optimisation. Par ailleurs, la puissance électrique que doit délivrer un aéronef de nouvelle génération est multipliée par 4 par rapport à un aéronef conventionnel. Cela induit un accroissement exponentiel du nombre d'équipements électriques, de leur masse globale et de leur encombrement. Pour atteindre les objectifs de réduction de masse et d'augmentation de la densité de puissance, il est impératif de trouver un ensemble de solutions cohérentes permettant d'optimiser les systèmes électriques embarqués. L'augmentation de la puissance massique de ces équipements passe par une augmentation des vitesses de rotation, donc une augmentation des contraintes. Un premier point est de s'assurer de la bonne tenue mécanique des matériaux. Un deuxième point est de pouvoir prendre en compte les modifications du comportement magnétique (et donc *in fine* du couple) lorsqu'ils sont soumis à un état de contraintes. On sait d'autre part que l'état de contraintes des matériaux magnétiques au sein d'une machine tournant à grande vitesse est multiaxial et que les modifications du comportement magnétique (susceptibilité, pertes) d'un matériau soumis à un état mécanique multiaxial diffère de celui d'un matériau soumis à un chargement uniaxial. L'optimisation de machines tournantes à grande vitesse passe donc par le développement de modèles de comportement magnéto-mécanique multiaxiaux.

Le travail qui s'est engagé depuis une année en partenariat avec TAES et Aperam Imphy Alloys [1] a ainsi pour objectifs la mise en évidence expérimentale des phénomènes de couplage magnéto-mécanique, la modélisation des lois de comportement des matériaux, ainsi qu'une mise en place d'une modélisation (type éléments finis) d'une géométrie optimisée de rotor, avec les comparaisons modèle/expérience correspondantes.

2 ETAT MULTIAXIAL DANS LES MACHINES TOURNANTES

Une modélisation par éléments finis d'une tôle de rotor tournant à la vitesse angulaire $\vec{\omega} = \omega \cdot \vec{e}_z$ a été effectuée en utilisant le code de calcul par éléments finis (EF) Abaqus®. On peut observer sur la figure 1(a) la géométrie rotor/stator retenue. Les forces de volume sont radiales telles que: $\vec{f}_v = \rho r \omega^2 \cdot \vec{e}_r$ (ρ : masse volumique, r : position radiale). Un quart du rotor est modélisé (la figure 1(b) montre le maillage et les conditions aux limites utilisées); compte-tenu de la faible épaisseur de la tôle ($e = 0,2mm$) le calcul est réalisé en contraintes planes. Les contraintes locales sont calculées à chaque nœud du maillage. À l'issue des simulations réalisées, on obtient un tenseur des contraintes sous la forme suivante (1):

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} \\ \sigma_{r\theta} & \sigma_{\theta\theta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Nous avons tracé sur la figure 2 une carte d'isovaleurs des composantes du tenseur (1) dans le rotor. Les simulations numériques sont données pour une vitesse angulaire $\omega = 4190 \text{ rad/s}$ (soit 40000 tr/min), un module de Young $E = 235 \text{ GPa}$, un coefficient de poisson $\nu = 0,27$ et une masse volumique $\rho = 8120 \text{ kg/m}^3$. La contrainte dominante est la contrainte radiale σ_{rr} . Cette contrainte peut atteindre le double de la contrainte ortho-radiale $\sigma_{\theta\theta}$ dans certaines zones. Des situations d'équibitraction sont rencontrées sur l'ensemble de la structure. Cette première approche purement mécanique illustre la réalité de la multiaxialité des contraintes dans un rotor. Le niveau de contraintes atteint est proportionnel à la vitesse angulaire au carré.

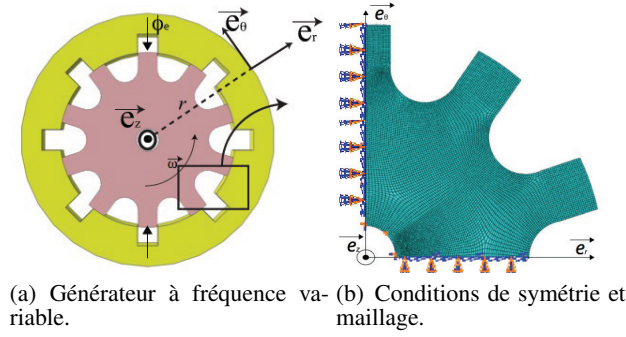


FIG. 1 – Exemple d'un ensemble rotor stator d'une machine à grande vitesse.

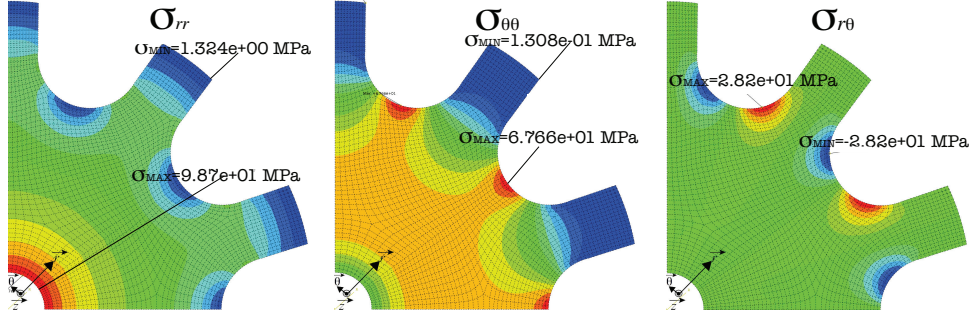


FIG. 2 – Distribution des contraintes dans la structure modélisée du rotor.

3 DEMARCHE ADOPTÉE

3.1 Modélisation

Lorsqu'on soumet un matériau ferromagnétique à un champ magnétique, il s'aimante. Les grandeurs décrivant cet état magnétique sont le champ magnétique \vec{H} et l'aimantation \vec{M} . La relation de comportement peut s'exprimer comme la relation entre ces deux grandeurs :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2)$$

χ est la susceptibilité magnétique du matériau.

Lorsqu'on applique une contrainte sur un matériau, il se déforme. Les grandeurs utilisées pour décrire l'état mécanique sont la contrainte σ et la déformation élastique ϵ_e , qui sont des tenseurs d'ordre 2. La loi de comportement qui les relie peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma = \mathbb{C} : \epsilon_e \quad (3)$$

Dans le cadre de l'élasticité linéaire, le tenseur d'ordre 4 \mathbb{C} est un tenseur à coefficients constants.

Les phénomènes de couplage magnéto-mécanique ont deux manifestations principales: la déformation de magnétostriction et l'effet des contraintes sur l'aimantation. Quand un matériau ferromagnétique est soumis à un champ magnétique, il se déforme. Cette déformation, appelée magnétostriction et notée ϵ_μ , est généralement isochore [2]. L'application d'une contrainte modifie le comportement magnétique. Pour les matériaux à magnétostriction "positive", une contrainte de traction entraîne une augmentation de la susceptibilité pour des champs magnétiques faibles, mais une chute pour des niveaux de champ magnétique plus élevés. Une contrainte de compression conduit en revanche généralement à une chute de la susceptibilité. L'influence sur le comportement magnétique de l'application d'une contrainte n'est pas symétrique en traction et compression. La déformation de magnétostriction d'un matériau magnétique est par ailleurs fonction de l'état de contrainte mécanique auquel il est soumis. Ces constatations se traduisent par les relations de comportement suivantes :

$$\epsilon(\vec{M}, \sigma) = \epsilon_e(\sigma) + \epsilon_\mu(\vec{M}, \sigma) \quad (4)$$

$$\vec{M}(\vec{H}, \sigma) = \chi(\vec{H}, \sigma) \cdot \vec{H} \quad (5)$$

où ϵ figure la déformation totale. La modélisation que nous envisageons est une modélisation multi-échelle [3]. Nous nous basons sur un modèle réversible à trois échelles (le domaine magnétique, le grain et le polycristal) utilisant des procédures de localisation et d'homogénéisation des quantités magnétiques et mécaniques. Ce modèle permet en particulier de reproduire les effets de la texture cristallographique. L'intégration dans la modélisation des mécanismes responsables de l'hystérésis magnétique est un travail en cours débuté par KJ Rizzo dans ses travaux de thèse [4] pour prendre en compte les pertes par hystérésis. La mise en place du calcul des pertes dynamiques est un des objectifs majeurs du travail en cours.

3.2 Identification et validation expérimentale

Le comportement magnétique est sensible à la texture cristallographique qui caractérise certains matériaux magnétiques (tôles laminées). La texture conduit en effet à une forte anisotropie du comportement magnéto-mécanique et magnétostrictif. Ce point sera étudié avec soin.

L'objectif de nos essais est d'autre part de fournir les éléments expérimentaux permettant d'identifier et/ou de valider les modélisations proposées. En effet, la construction de modèles multiaxiaux à partir de considérations énergétiques nécessite habituellement d'identifier les paramètres à partir d'essais simples (par exemple uniaxiaux), puis de valider les approches à partir d'essais plus complexes tels que les essais multiaxiaux. Les essais d'identification ont consisté à mesurer le comportement magnéto-mécanique des matériaux sous chargement mécanique uniaxial (y compris à haute fréquence). Les essais de validation seront réalisés sur la machine électro-hydraulique triaxiale ASTREE du LMT-Cachan.

3.3 Modélisation simplifiée

Les outils de modélisation disponibles sont souvent limités au cas de sollicitations uniaxiales. Cette configuration est extrêmement restrictive. Une solution alternative consiste à recourir à la notion de contrainte équivalente. Dans le cas du comportement magnéto-élastique, la contrainte équivalente pour un chargement multiaxial donné est la contrainte uniaxiale qui, appliquée parallèlement au champ magnétique, conduit au même effet sur le comportement magnéto-élastique que le chargement réel. La contrainte équivalente magnéto-mécanique est définie comme la contrainte uniaxiale qui modifie le comportement mécanique de manière similaire à la contrainte multiaxiale correspondante. Une possibilité d'écriture de la contrainte équivalente magnéto-mécanique pour un état de contrainte multiaxial quelconque est la suivante [5]:

$$\sigma_{eq} = \frac{2}{3k} \ln \left(\frac{2 \exp(\frac{3k}{2} \vec{x} \mathbf{S} \vec{x})}{\exp(\frac{3k}{2} \vec{y} \mathbf{S} \vec{y}) + \exp(\frac{3k}{2} \vec{z} \mathbf{S} \vec{z})} \right) \quad (6)$$

\mathbf{S} représente le déviateur des contraintes, $k = A_s \lambda_m$, en notant A_s le paramètre d'ajustement utilisé dans la modélisation multi-échelle et λ_m la déformation de magnétostriction maximale du matériau.

4 PREMIERS RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous présentons dans ce document les résultats des mesures obtenues avec un alliage de Fer-Cobalt. Ces me-

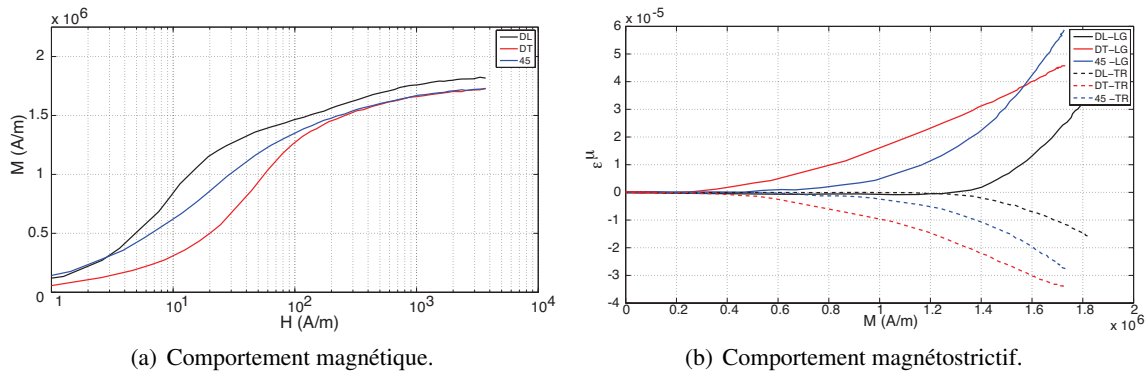


FIG. 3 – Evolution du comportement magnéto-mécanique en fonction de l'orientation de mesure pour le Fe-49%Co-2%V.

sures mettent tout d'abord en évidence une anisotropie du comportement magnétique en particulier pour les faibles valeurs de champ ($H < 200 \text{ A/m}$), la direction du laminage (DL) atteint l'aimantation la plus élevée, les comportements à 45° et 90° sont proches pour des niveaux de champs supérieurs à 500 A/m . La figure 3 (b) montre l'évolution de la déformation longitudinale (LG) et transversale (TR) en fonction de l'aimantation. La déformation longitudinale est positive et son amplitude vaut approximativement le double de la déformation transversale, le matériau "s'allonge" dans la direction du champ et se "contracte" dans la direction perpendiculaire au champ. Cette contraction est plus importante lorsque le champ devient orthogonal à la direction du laminage.

Nous présentons par la suite les principaux résultats expérimentaux, obtenus suite à des essais de traction/compression instrumentés pour les mesures magnétiques et magnétostrictives, ils viennent compléter la connaissance du comportement magnéto-mécanique du matériau.

Réaliser, une compression homogène sur une éprouvette de $0,2 \text{ mm}$ d'épaisseur est un exercice difficile. La solution passe par l'utilisation d'une structure sandwich : éprouvette-âme-éprouvette afin d'augmenter le moment quadratique de l'ensemble. Pour le choix du matériau constitutif de l'âme, l'aptitude première est le caractère

amagnétique du matériau, pour ne pas perturber les mesures. La montée en fréquence impose que le matériau ne soit pas conducteur non plus. Nous utilisons une âme centrale en Bakélite. Des essais mécaniques ont été réalisés au préalable pour déterminer l'influence de l'âme centrale sur le comportement global. Tous les essais sont pilotés en effort imposé. Nous présentons des mesures anhystériques de comportement magnétique et magnétostrictif pour des niveaux de contrainte allant de -100MPa à +100MPa.

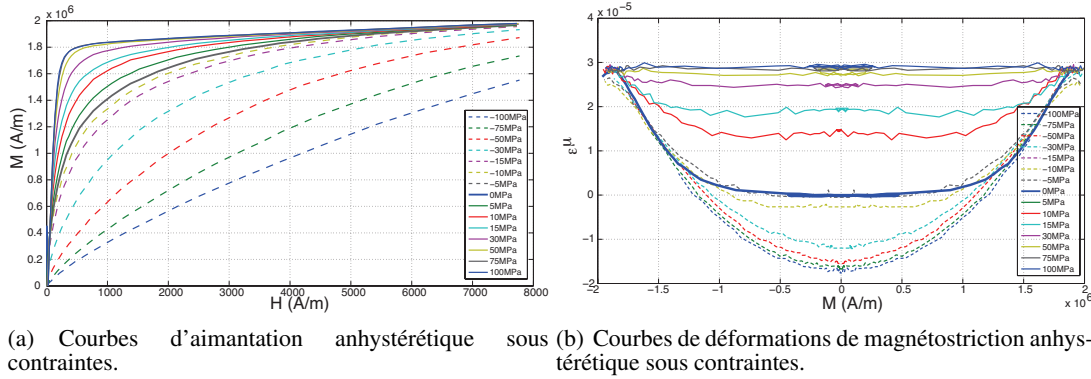


FIG. 4 – Evolution du comportement magnéto-mécanique et magnétostrictif du Fe-49%Co-2%V sous chargement uniaxial.

A bas champ, la compression conduit à une forte chute de la susceptibilité χ et à une sensible augmentation de sa valeur en traction. La compression conduit à une augmentation de l'amplitude de magnétostriction figure 4 (b) (magnétostriction longitudinale négative à champ nul). La traction provoque une diminution de l'amplitude jusqu'à la saturation mécanique.

Les figures suivantes illustrent l'influence de la fréquence d'excitation magnétique sur l'évolution de l'hystérésis magnétique. À chargement mécanique nul figure 5 (a), l'augmentation de la fréquence conduit à une

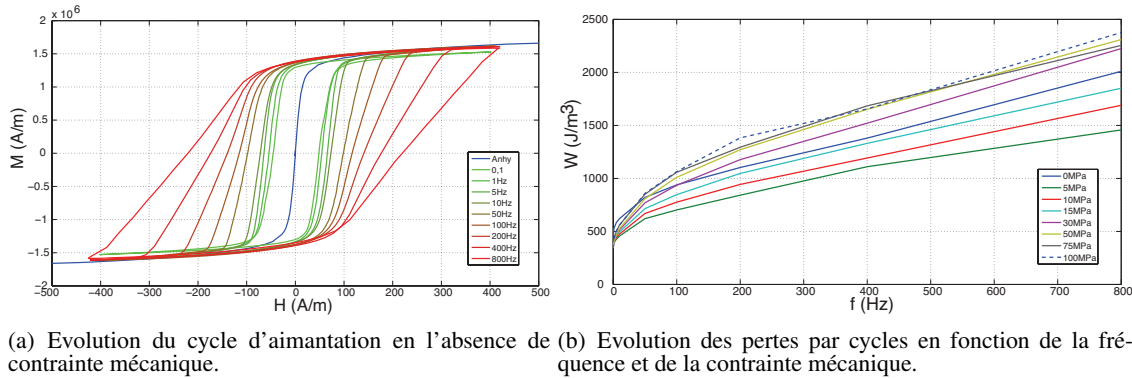


FIG. 5 – Evolution du cycle d'aimantation et des pertes en fonction de la fréquence d'un échantillon de Fe-49%Co-2%V sollicité suivant l'orientation cristallographique DL pour un niveau d'induction égale à 1,88T.

augmentation très prononcée de l'aire des cycles. Le champ coercitif suit cette augmentation. Par ailleurs, l'aimantation rémanente reste quasiment constante. On a également tracé sur la figure 5 (b) l'évolution de l'énergie dissipée par cycle en fonction de la fréquence et du niveau de contrainte appliquée. L'augmentation de la dissipation avec la fréquence est un résultat attendu. On constate qu'une contrainte de traction augmente les pertes d'une manière significative quelle que soit la fréquence.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Programme 3MT, référence du projet [3MT CV 01]
- [2] R.M. Bozorth, "Ferromagnetism", ed. D. Van Norstand Company, N.Y. 1951.
- [3] L. Daniel *et al*, "Reversible magneto-elastic behavior: A multiscale approach", JMPS, 56 (2008) p1018.
- [4] K. J. Rizzo, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, (2012).
- [5] O. Hubert et L. Daniel, "Energetical and multiscale approaches for the definition of an equivalent stress for magneto-elastic couplings", JMMM, 323 (2011) p1766-1781.